УДК 621.3

УСКОРЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ НА НАДЕЖНОСТЬ ОБМОТОК СТАТОРА И РОТОРА СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

З.А. Беллуян

Государственный инженерный университет Армении. г. Ереван

Предложена методика выбора параметров форсированного режима и обоснованы верхние границы факторов при проведении ускоренных испытаний обмоток статора и ротора синхронных генераторов. Приведены результаты ускоренных испытаний конкретных генераторов и получено уравнение регрессии. Методика может быть использована для любых электротехнических изделий при соответствующих планах испытаний.

Для генераторов, время безотказной работы (наработка на отказ) которых составляет более 1000 ч, испытания на надежность обычно проводятся с форсированием основных воздействующих факторов. Такие испытания называются ускоренными.

В настоящее время имеется ряд работ, в которых рассмотрены проблемы ускоренных испытаний для различных узлов генераторов: блока регулирования напряжения, подшипникового узла и контактно-щеточного узла [1].

В данной работе приведены результаты исследований, направленные на разработку методики ускоренных испытаний обмоток статора и ротора генераторов.

В условиях эксплуатации генераторы различного назначения и исполнения подвергаются различным воздействиям: температура, влажность, запыленность, ударные нагрузки, вибрация и т.д. [2]. Чтобы выбрать тот или иной фактор, необходимо учесть степень их влияния на надежность данного узла и, что главное, – контролируемость и возможность регулирования их величин в заданных пределах. Поскольку температура обмотки и вибрация наиболее интенсивно влияют на надежность и они контролируемы, и их уровни можно регулировать, то в качестве форсирующих факторов для обмоток статора и ротора выбраны температура и вибрация.

При проведении испытаний в ускоренных режимах воспроизводятся также другие значимые факторы, такие как влажность, запыленность окружающей среды и ударные нагрузки. Уровни этих факторов должны соответствовать реальным условиям эксплуатации генераторов.

Таблица 1. *Уровни форсирующих факторов и интервалы их варьирования*

Независимые переменные	Уровень изменения переменных			Интервал изменения переменных	Независимые переменные в относительных единицах
	нижний −1	нулевой 0	верхний +1		
Температура обмотки ротора	125 °C	152,5 °C	180 °C	27,5 °C	$X_{1p} = \frac{T - 152,5}{27,5}$
Температура обмотки статора	130 °C	145 °C	160 °C	15 °C	$X_{1cm} = \frac{T - 145}{15}$
Вибрация, мкм	40	55	70	15	$X_2 = \frac{A - 55}{15}$

Для обмоток статора и ротора генератора задача нахождения максимального уровня форсирования решается анализом влияния предельных величин нагрузок, приводящих к отказу без изменения физики разрушения или старения.

Предельная температура обмоток при ускоренных испытаниях генераторов устанавливается в пределах, при которых температура отдельных узлов генератора не превышала бы предельных величин, установленных для этих узлов. Исследования показали, что при данных условиях предельные температуры обмоток не должны превышать: для класса нагревостойкостн изоляции обмоток B – 180 °C, F – 190 °C, а для класса H – 220 °C [1].

Необходимое значение температуры обмоток ротора при ускоренных испытаниях достигается изменением расхода охлаждающего воздуха (путем дросселирования вентиляционных окон), проходящего через генератор при заданной температуре воздуха, окружающего генератор [2].

Требуемая амплитуда вибрации обмоток достигается созданием дополнительной неуравновешенности ротора генератора

Уровни форсирующих факторов и интервалы их варьирования для обмоток статора и ротора приведены в табл. 1.

Испытания обмоток производится в составе генератора [1, 2].

До проведения приработочных испытаний генератор разбирается, и на лобовых частях обмотки статора, на выходе из паза устанавливаются термопары и вибродатчики.

Температура обмоток ротора и статора устанавливается изменением расхода охлаждающего воздуха и контролируется через каждые 150 ч работы, а требуемые значения уровня вибрации обмоток статора и ротора устанавливаются с помощью добавляемых масс дисбаланса в пазах балансировочных дисков [1] и контролируются через каждые 50 ч работы генератора.

Критериями отказов обмоток статора и ротора являются: пробой межвитковой и корпусной изоляции; межвитковые замыкания; замыкание витков между собой и на корпус и обрыт витков.

По сути мы имеем дело с двумя независимыми переменными X_1 и X_2, каждую из которых варьируем в двух уровнях, условно обозначенных символами "+1" и "–1". В запланированном эксперименте проводится полный факторный эксперимент типа 2^2.

Матрица планирования и кодовые значения переменных представлены в табл. 2 [3]. А уравнение регрессии доя этого вида планирования имеет вид [2, 3]:

$$T = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{12} X_1 X_2 ,$$

где T – наработка на отказ; b_0, b_1, b_2, b_{12} – коэффициенты уравнения регрессии, значения которых определяются по данным испытаний согласно [3].

$$\sum_{n=1}^{N} Y_n / N;\ b_1 = \sum_{n=1}^{N} X_{in} Y_n / N;\ b_{ij} = \sum_{n=1}^{N} X_{in} X_{jn} Y_n / \sum X_{in}^2 .$$

Как видно из табл. 2, для полного факторного эксперимента типа 2 требуется провести 5 опытов. Количество повторяемости опытов на каждом уровне из соображений получения требуемой точности принято 4, т.е. проведено 20 опытов (экспериментов).

Таблица 2. *План факторного эксперимента для двух независимых переменных*

Номер эксперимента	Факторы				Вектор выхода Y
	X_0	X_1	X_2	X_1X_2	
Планирование типа 2^2					
1	+1	+1	+1	+1	Y_1
2	+1	+1	−1	−1	Y_2
3	+1	−1	+1	−1	Y_3
4	+1	−1	−1	+1	Y4
Нулевая точка					
5	+1	0	0	0	Y_0

Для каждой строки матрицы планирования определяются средние значения наработки до отказа. Оценка значимости коэффициентов уравнений регрессии производится по t-критерию Стьюдента при доверительной вероятности 0,95, а проверка адекватности – по критерию Фишера [3].

Испытаниям на надежность подвергались 16 генераторов серии ОС (8 генераторов типа ОС-71 мощностью 16 кВт и 8 генераторов типа ОС-72 мощностью 30 кВт). Половина указанных генераторов работала в режиме двигателя. Испытания ге-

Таблица 3. *Зачетные отказы обмоток статора и ротора*

Номера п/п	Заводской номер генератора (Г), двигателя (Д)	Фактическая наработка в ускоренном режиме, ч	Наработка при нормальных условиях, ч	Обмотки ротора		Обмотки статора	
				Количество отказов, шт	Время отказов, ч	Количество отказов, шт	Время отказов, ч
1	Г427 (30 кВт)	5169	31000	1	12	1	1190
2	Д422 (30 кВт)	5169	31000	1	14	–	–
3	Г417 (30 кВт)	2548	150000	1	312	1	998
4	Д420 (30 кВт)	2548	15000	–	–	2	894; 1138
5	Г416 (30 кВт)	3307	200000	2	3; 2401	2	2203; 2401
6	Д434 (30 кВт)	3307	20000	2	10; 1663	1	200
7	Г418 (30 кВт)	2083	12000	1	1387	2	1387; 1410
8	Д435 (30 кВт)	2083	12000	–	–	–	–
9	Г485 (16 кВт)	5657	34000	1	1243	–	–
10	Д478 (16 кВт)	5657	34000	–	–	–	–
11	Г479 (16 кВт)	5936	35000	–	–	–	–
12	Д486 (16кВт)	5936	35000	1	2228	–	–
13	Г 480 (16 кВт)	5707	34000	1	4652	–	–
14	Д483 (16 кВт)	5707	34000	1	2915	1	4335
15	Г477 (16 кВт)	6497	39000	–	–	–	–
16	Д481 (16 кВт)	6497	39000	–	–	–	–

Таблица 4. *Наработка на отказ генераторов при испытаниях*

Номер эксперимента	Номера генераторов (Г) и двигателей (Д), работающих в заданных режимах		Наработка, ч	
	обмотка статора	обмотка ротора	обмотка статора	обмотка ротора
1	Д422, Г427, Г416, Д420	Г427, Г416, Г485	3040	3033
2	Г417, Г479, Г418	Г418, Г479	3255	7217
3	Д434, Д478, Г485, Д486	Д434, Д478, Д486, Д483	20573	4926
4	Г480, Д481, Г437	Д420, Д435, Г481, Г480	39976	16835
5	Г477, Д435	Г471, Г417, Д422	7790	6469

нераторов и их узлов проведены по плану [N, U, T]. В процессе испытаний зафиксированы как внезапные, так и износовые отказы.

Зачетные отказы обмоток статора и ротора приведены в табл. 3, а в табл. 4 приведена наработка на отказ агрегатов (генераторов и двигателей) при испытаниях.

После оценки значимости коэффициентов получены следующие уравнения регрессии, связывающие наработку на отказ обмоток с воздействующими факторами:

– для обмотки ротора

$$T_{об.рот.} = 7686 - 2877X_i - 4023X_2 + 1931X_1X_2,$$

– для обмотки статора

$$T_{об.ст.} = 15510 - 13510X_i - 4905X_2 + 4797X_1X_2.$$

По полученным уравнениям регрессии определяются коэффициенты ускорения испытаний в зависимости от уровней воздействующих факторов:

$$K_{Y_i} = T_{H_1} / T_{B_1},$$

где T_{H_1} и T_{B_1} – наработки на отказ соответственно при нижних и верхних значениях уровней воздействующих факторов.

Нижний уровень воздействующих факторов соответствует условиям нормальной эксплуатации, заданным в ТЗ или ТУ на генераторы, а верхний – ужесточенному режиму воздействия при ускоренных испытаниях на надежность.

Если учесть, что основная часть серийно выпускаемых генераторов мощностью до 100 кВт конструктивно практически одинаковы, изготавливаются из одних и тех же конструкционных и изоляционных материалов, то для определения влияния различных уровней внешних воздействующих факторов на надежность генератора и его обмоток статора и ротора в процессе проектирования можно воспользоваться полученными выше зависимостями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Отраслевой стандарт ОСТ 16 0.801.218-84. Машины электрические вращающиеся от 63 до 355 габарита включительно. Генераторы синхронные явнополюсные высокоскоростные. Методика ускоренных испытаний на надежность. — М.: Стандартэлектро, 1984.
2. Беллуян З.А. Основные принципы разработки ускоренных испытаний генераторов на надежность // Информационные Технологии и Управление (Ереван). — 2001. — № 1.
3. Налимов В.В., Чернова Н.А. Статистические методы планирования экспериментальных исследований. — М.: Наука, 1965.